FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ e.V.
Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)

Loseblattsammlung
Arbeitskreis
Inkorporationsüberwachung (AKI)

Inkorporationsüberwachung auf Jod

FS-81-21-AKI
November 1981

Loseblattsammlung
Arbeitskreis Inkorporationsüberwachung (AKI)

Lieferung 1982

1. Inkorporationsüberwachung auf Uran
   FS-80-23-AKI

   Blatt 6 Seite 2/2 austauschen gegen

   Neulieferung Blatt 6 Seite 2/2 - Stand November 1981

2. Inkorporationsüberwachung durch Direktmessung der Körperaktivität
   FS-80-24-AKI

   Blatt 5 Seite 10 austauschen gegen

   Neulieferung Blatt 5 Seite 10 - Stand November 1981

   Neulieferung Blatt 5 Seite 15 bis 17 einfügen nach Seite 14

   Blatt 6 Seite 1/2 austauschen gegen

   Neulieferung Blatt 6 Seite 1/2 - Stand November 1981

3. Inkorporationsüberwachung auf Jod
   FS-81-21-AKI Nov.1981

   Neulieferung

4. Biokinetisches Verhalten von radioaktiven Stoffen bei Inkorporation

   FS-82-22-AKI Febr.1982

   Neulieferung

Aus Versandttechnischen Gründen erhalten Sie die Blätter gemeinsam geleimt. Zur Einordnung müssen die Einzelblätter wieder getrennt werden.

/8/ R.Bader, W.J.Lorenz:
Ein Ganzkörperzähler für den Nachweis, die Indentifikation und die Lokalisation von inkorporierten Radionukliden über einen weiten Energie- und Intensitätsbereich
"Kerntechnik" (1977)

/9/ Arbeitsberichte der Zentralabteilung Strahlenschutz:
1.) 1966, Int.Bericht Nr. 98, S.26 ff
2.) 1967, Jül-543-St,S.71 ff u. S. 83 ff
3.) 1969, Jül-670-St,S.76 ff u. S. 97 ff
4.) 1973, Jül-1101-St,S.64 ff

/10/ H.Kiefer und R.Maushart
Die Karlsruher Analge zur Messung von Radioaktivität im Menschen. (Ganzkörperzähler")
Kerntechnik 3 (1961) 228-231

/11/ A.Schmitt and H.Fessler
Diagnosis and Treatment of Incorporated Radionuclids
INT.ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)-SR-6/47,Wien 1976

/12/ P.Mariß, E.Jahns, O.Schober
A Whole Body Counter with an Invariant Response for Whole Body Analysis.
Eur.J.Nucl.Med. 3:129-135 (1978)

/13/ Berthold Inkorporationsmonitor
7547 Wildbad 1
Datenblatt 58-2-1076

/14/ G.Balz
Ganzkörperzähler "Nürnberg"
Deutscher Röntgenkongress 1965, Sonderbände zur Strahlentherapie
Band 62 Teil B (Berlin und Wien 1966) 293-298

6.2 Bestimmung des Urans durch α-Aktivitätsmessung

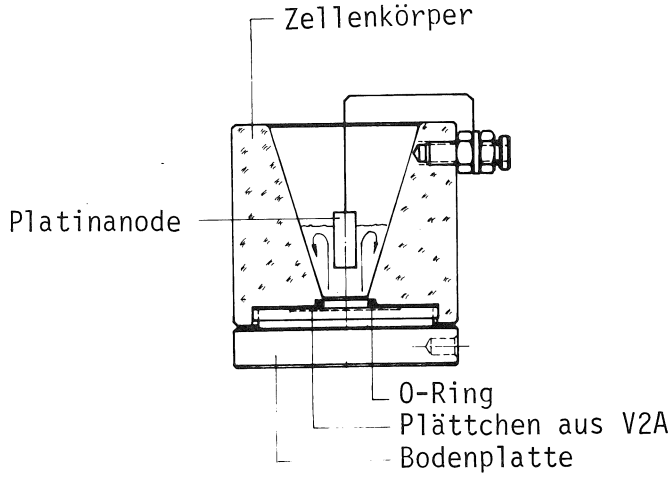
Das Meßpräparat wird mit destilliertem Wasser gespült und die α-Aktivität ausgemessen. Mit einer chemischen Ausbeute von 50 % ergibt sich als Nachweisgrenze des Verfahrens ein Wert von 0,1 pCi U/Probe.

Zum Nachweis der α-Aktivität des Urans werden im allgemeinen Halbleiterdetektoren mit geeigneten Diskriminatoren (Vielkanalanalysator) benutzt. Die Zählausbeute des Meßgeräts und der Nulleffekt der Anordnung sollen so gewählt sein, daß bei einer Meßdauer von 100 Minuten 0,1 pCi statistisch signifikant nachgewiesen werden können.

Verwendete Chemikalien

Salpetersäure	(14 M)	Trioctylamin	(10 %-ig)
Salzsäure	(0,1 M)	Diisopropyläther	
Salzsäure	(2 M)	Wasserstoffsuperoxid	(30 %-ig)
Salzsäure	(4 M)	Schwefelsäure	(konz.)
Salzsäure	(6 M)	Toluol	

Abb. Blatt 6, Seite 2/2: **Elektrolysezelle /19/**



5.10. Messanlage Neuherberg

1. Allgemeine Angaben

Institution: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München

Adresse: Ingolstädter Landstr. 1
8042 Neuherberg

verantw. Leiter: Dipl. Phys. A. Böhne

Anmeldung: Mo-Do (8h-16h) in Ausnahmefällen
Tel: 089/38742416
089/38742351

2. Vorhandene Ganzkörperzähler

Standardganzkörperzähler für Radionuklide mit Gammaquantenenergien größer 120 keV. /7/
Der Zähler kann auch als Teilkörperzähler verwendet werden.

3. Technische Daten des Zählers.

Abschirmung: 15cm Stahl.
Innenmaße: 2.03m x 1.49m x 2.12m

Detektoren: 4 NaJ(Tl) 4.5" x 4"

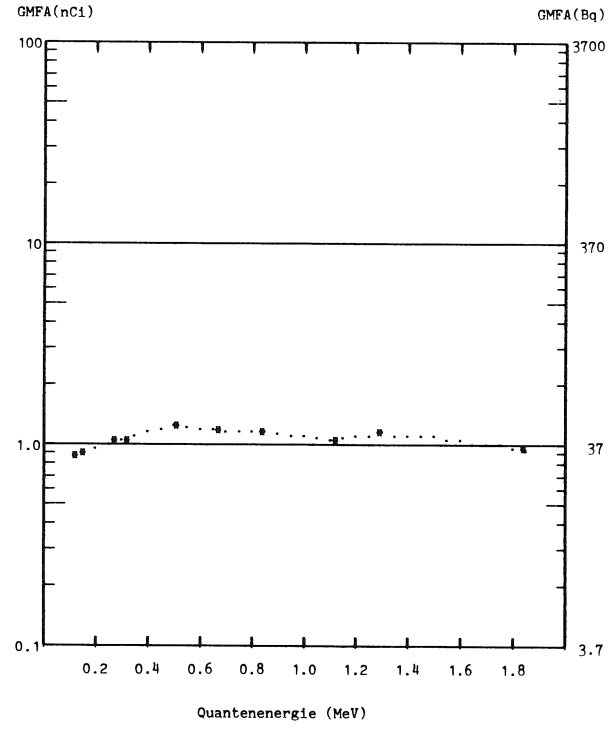
Meßgeometrie: Multidetektor Stretcher.

Meßzeit : 20 min

Auflösgsvm. : 9.6% für ^{137}Cs

Auswertung : Das gemessene Gammaspektrum wird mit Hilfe eines Tischrechners ausgewertet.

4. Grenzwert der minimal feststellbaren Aktivität (GMFA)



5.15. Messanlage Kiel

1. Allgemeine Angaben

Institution: Universitätsklinik
Radiologische Abteilung

Adresse: Arnold-Heller-Str. 9
2300 Kiel

verantw. Leiter: Prof. Dr. med H. Gremmel

Anmeldung: Mo-Fr (8h-17h) Tel: 0431/5974100
in Ausnahmefällen 0431/5974108
0431/5974101

2. Vorhandene Ganzkörperzähler

Standardganzkörperzähler für Radionuklide mit Gammaquantenenergien größer 50 keV. Der Zähler kann auch als Teilkörperzähler für alle Organe eingesetzt werden.

3. Technische Daten des Zählers.

Abschirmung: 15 cm Stahl, 3 mm Blei
Innenmaße: 1,8m x 2,5m x 2,1m

Detektoren: 4 NaJ 8"x2,5"

Meßgeometrie: Mehrdetektor-"Stretcher"
Mehrdetektor-Scanning

Meßzeit : 10 min

Auflösgsvm. : 8% für ^{137}Cs

Auswertung :

5.16. Messanlage Gießen

1. Allgemeine Angaben

Institution: Strahlenzentrum der Universität Gießen - Zentrale Abteilung -

Adresse: Leihgesterner Weg 217, 6300 Gießen

verantw. Leiter: Prof.Dr.E.L.Sattler, Peter Lewe

Anmeldung: Mo-Fr (9h-17h) Tel: 0641/702 2648; in Ausnahmefällen 0641/53392

2. Vorhandene Ganzkörperzähler

Standardganzkörperzähler für Radionuklide mit Gammaquantenenergien größer 100 keV. Der Zähler kann auch als Teilkörperzähler und als ortsauflösender Scanner eingesetzt werden. Vorhanden ist auch ein zusätzlicher Monitor für z.B. ^{125}J-Detektion über der Schilddrüse.

3. Technische Daten des Zählers.

Abschirmung: 1 cm Blei, 5 cm Stahl, 85 cm Quarzsand. Innenmaße: 2.7m x 2,4m x 2.3m

Detektoren: 4 NaJ(Tl) 6" x 7"
1 NaJ(TL) 3" x 3"

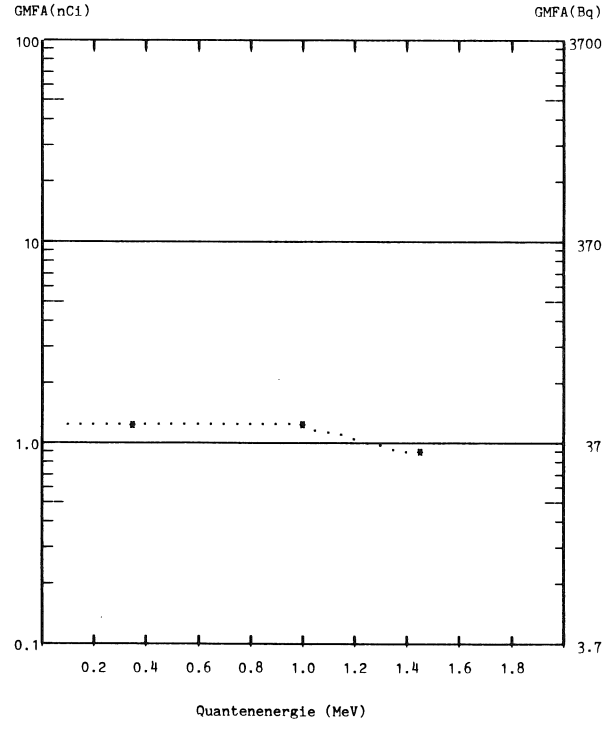
Meßgeometrie: Mehrfachdetektor-Stretcher

Meßzeit : 20 min

Auflösgsvm. : 7.5% für ^{137}Cs

Auswertung : Mit Hilfe eines Online-Prozeßrechners. Auswertezeit ca. 1 min.

4. Grenzwert der minimal feststellbaren Aktivität (GMFA)



5.17. Messanlage Hannover

1. Allgemeine Angaben

Institution: Medizinische Hochschule Hannover
Abtlg. f. Nuklearmedizin u. spezielle
Biophysik - Ganzkörperzähler -
Adresse: Karl-Wiechert-Allee 9
3000 Hannover 61

verantw. Leiter: Prof.Dr.H.Hundeshagen
Dr.Dr.O.Schober
Dr.D.Junker

Anmeldung: Mo-Fr (8h-17h) in Ausnahmefällen
0511/532 2580 05139/4118
0511/532 3896 0511/528895
0511/532 3197 0511/613426

2. Vorhandene Ganzkörperzähler

Standardganzkörperzähler mit Scan-Modus oder mit fixierten Detektoren für Radionuklide mit Gammaquantenenergie größer als 20 keV und mit Betamaximalenergie größer als 1 MeV. Der Zähler kann auch als Teilkörperzähler für beliebige Organe eingesetzt werden (z.B.Schilddrüse, Leber, Nieren etc.) Weiterhin können im Scanmodus eindimmensionale Längsprofile mit der entsprechenden Aktivitätsverteilung aufgenommen werden. /12/

3. Technische Daten des Zählers.

Abschirmung: 15 cm Stahl, 30 cm Beton
Innenmaße: 2.75m x 3.25m x 2.15m

Detektoren: 6 NaJ(TL) 5"x4"
Durch fokussierende lamellierte Schlitzkollimatoren wird eine räumliche Auflösung in Körperlängsrichtung von ca. 15 cm erreicht. Die Empfindlichkeit des Ganzkörperzählers wird dann um den Faktor 4-5 herabgesetzt.

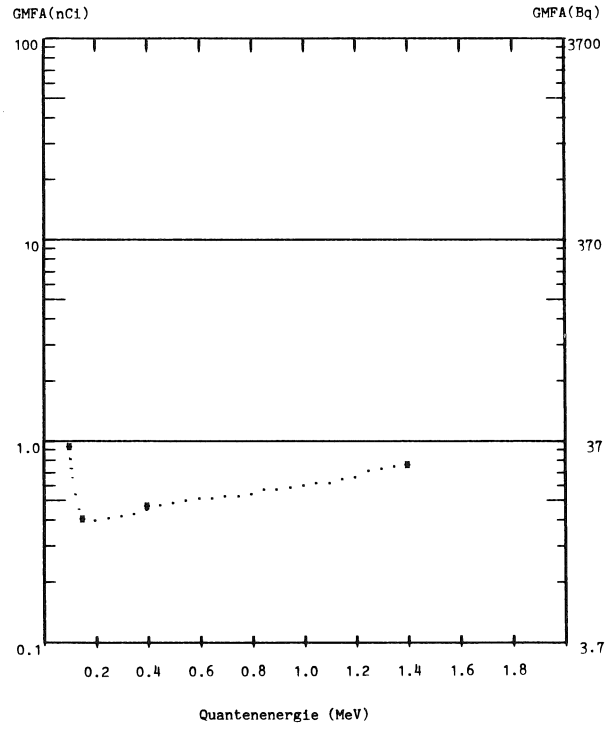
Meßgeometrie: Multi-Detektor-Scanning, kreisförmige Detektor-Anordnung um den Patienten, 3 Detektoren oberhalb, 3 Detektoren unterhalb des Patienten.
Scanlänge: 228 cm.

Meßzeit : 30 min.

Auflösgsvm. : 8% für ^{137}Cs

Auswertung : Manuell mit Tischrechner.
Auswertezeit: 10 min

4. Grenzwert der minimal feststellbaren Aktivität (GMFA)



FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ e.V.
Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)

Loseblattsammlung
Arbeitskreis
Inkorporationsüberwachung (AKI)

Inkorporationsüberwachung auf Jod

FS-81-21-AKI
November 1981

IRPA FS	INKORPORATIONSÜBERWACHUNG AUF JOD	JOD
	INHALTSVERZEICHNIS	

		Blatt	Seite
1.	Allgemeines	1	1
1.1.	Erzeugung und Anwendung von Radiojod	1	1
1.2.	Notwendigkeit der Inkorporationsüberwachung	1	2
1.3.	Konzentration des stabilen Jods (J-127) in der Natur	1	3
2.	Physikalische Daten einiger Jodisotope	2	1
2.1.	Umwandlungsdaten	2	1
2.2.	Erzeugung von Radiojod	2	2/1
2.2.1.	... für medizinische Zwecke	2	2/1
2.2.2.	... im nuklearen Brennstoffkreislauf	2	2/2
3.	Daten zum Jodstoffwechsel	3	1/1
3.1.	Form, Lage und Aufbau der Schilddrüse	3	1/2
3.2.	Funktion der menschlichen Schilddrüse	3	2/1-2/6
4.	Biologische Wirkung von Radiojod (Radiologische Toxizität)	4	1
4.1.	Frühschäden	4	2
4.2.	Spätschäden	4	3
4.3.	Dosisberechnungen	4	4/1
4.3.1.	Dosisberechnung und Berücksichtigung des inidividuellen Stoffwechselverhaltens	4	4/1-4/2
4.3.2.	Beurteilung von Messdaten der Inkorporationsüberwachung mittels Stoffwechselmodellen der ICRP	4	4/3
4.3.2.1.	Methode der Beurteilung	4	4/4
4.3.2.2.	Beurteilung einer einmaligen Jodinkorporation	4	4/5
4.3.2.3.	Beurteilung wiederholter Inkorporationen (Dauerbelastung)	4	4/6-4/8

Bearbeiter: W. Burkart, B. Glöbel, W. Görlich
Ch. Wernli

Stand Nov. 1981

INHALTSVERZEICHNIS

		Blatt	Seite
5.	Möglichkeiten zur Verringerung der Jodexposition der Schilddürse	5	1/1
5.1.	Grundlagen der Therapie	5	1/1
5.1.1.	Jodid-Therapie	5	1/2-1/3
5.1.2.	Blockierung der Jodaufnahme der Schilddrüse	5	1/4
5.1.3.	Blockierung der Hormonsynthese	5	1/5
5.1.4.	Stimulierung der Hormonausschüttung	5	1/6
5.2.	Einsatz von Therapien nach Zwischenfällen	5	2/1-2/2
5.3.	Radiojod-Emission nach Unfällen	5	3/1-3/2
6.	Inkorporationsüberwachung	6	1
6.1.	Personenkreis und Ueberwachungsintervalle	6	1
6.2.	Messmethoden, Detektoren	6	2/1
6.2.1.	Schilddrüsenmessungen	6	2/2-2/3
6.2.2.	Urinmessungen	6	2/4-2/5
6.3.	Arbeitsplatzüberwachung	6	3
7.	Glossarium	7	1/1-1/3
8.	Jod-Chemie	8	1/1-1/2
9.	Literaturverzeichnis	9	1

1.1. Erzeugung und Anwendung von Radiojod

Von den über 20 bekannten radioaktiven Jodisotopen sind die Nuklide I-123, I-125 und I-131 für die Inkorporationsüberwachung von Bedeutung.

Eine Reihe weiterer Jodisotope, die in Kernkraftwerken und bei der kommerziellen Herstellung von Jodisotopen auftreten, sind in Tabelle 2 aufgeführt: Diese Nuklide sind nur bei Zwischenfällen von der Inkorporationsüberwachung zu berücksichtigen, da sie sonst nicht in nennenswerten Konzentrationen auftreten.

Eine Sonderstellung nimmt das langlebige Isotop I-129 ein, dessen Freisetzung in Wiederaufbereitungsanlagen zu einer Belastung der Biosphäre führen kann.

- Radiojodisotope entstehen bei der Uran- und Plutoniumspaltung in grossen Mengen (Spaltausbeute 2,03 % für Jod-123, 1 % für Jod-129, 2,8 % für Jod-131, 4,38 % für Jod-132, 6,62 % für Jod-133, 8,06 % für Jod-134, 6,45 % für Jod-135).

- Für die nuklearmedizinische Diagnostik wird I-123 in zunehmenden Mengen im Zyklotron produziert und ersetzt I-131 und I-125 immer stärker. Die verwendeten Aktivitäten liegen bei 0,05 mCi (1,85 MBq) bis 0,1 mCi (3,7 MBq) I-123 pro Schilddrüsendiagnose.

- Für Radioimmunoassays und andere in-vitro-Bestimmungen der Nuklearmedizin und in der Forschung wird I-125 eingesetzt, pro Markierung ca. 1 mCi (3,7 MBq). Kommerziell erhältliche RIA Kits enthalten in der Regel 5 µCi (185 kBq).

1.2. Notwendigkeit der Inkorporationsüberwachung

- Für therapeutische Zwecke wird I-131 in der Medizin verwendet. Bei Schilddrüsenüberfunktion und autonomen Adenomen bis 20 mCi (740 MBq) pro Therapie, bei der Krebstherapie 100 - 200 mCi (3,7 - 7,4 GBq).

Im Menschen finden sich etwa 90 % des Jodvorrats in der Schilddrüse gespeichert, die Masse der Schilddrüse entspricht aber nur ungefähr 0,06 % des Körpergewichts. Zusammen mit der langen biologischen Halbwertszeit (USA 138 d, Deutschland 80 - 100 d), führt dies zu einer hohen Strahlenbelastung der Schilddrüsen, wenn Radiojod in den Menschen gelangt. Dies ist heute bei einem relativ grossen Personenkreis möglich, wenn beispielsweise durch nukleare Testexplosionen, Kernwaffeneinsatz, mögliche Kernkraftwerksunfälle oder bei industrieller und medizinischer Verwendung Radiojod freigesetzt wird. Radiojod gelangt zusammen mit stabilem Jod über Luft, Nahrung, Getränke und eventuell die Haut in den Organismus, wo es in den normalen Jodstoffwechsel aufgenommen wird und analog dem stabilen Jod sich dort verteilt. Die Erkennung möglicher Inkorporationen von Radiojod in einem der oben aufgeführten Fälle kann durch externe Untersuchung der Schilddrüse oder einer Urinprobe mit Hilfe eines Detektors erfolgen. Bei festgestellter Inkorporation können Massnahmen, einerseits zur Reduktion der Radiojodaufnahme in die Schilddrüse, andererseits zur Verkürzung der biologischen Halbwertszeit eingeleitet werden.

1.3.1 Natürliches Vorkommen von I-129

Durch spontane Spaltung von Uran und Thorium in Ozean und Boden, durch die Reaktion von Xenon mit kosmischer Strahlung entsteht laufend I-129. Das Gewichtsverhältnis zum stabilen Jod liegt im Bereich

$$\frac{\text{I-129}}{\text{I-127}} = 10^{-13} - 10^{-15}$$

Tabelle 1 : I-127-Gehalt und Aktivität des natürlich entstandenen I-129 in 1 Liter Meerwasser und in der menschlichen Schilddrüse

	I-127-Konzentration (ppm)	Gehalt an I-129 (g)	Aktivität (pCi)	Dosis (rem/Jahr)
Meerwasser	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-19}$	$2 \cdot 10^{-11}$	
Schilddrüse :				
USA: 20g	600	$1{,}2 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{-12}
Deutschland: 40g	300	$1{,}2 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{-12}

2.1 Umwandlungsdaten

Tabelle 2

Massen-zahl	Halbwertszeit ($T_{1/2}$)	γ-Energien einiger Gammastrahlen in MeV	γ-Intensität d.Gammastrahlen in %
I-123	13,30 H	0,027 (X)*	71,0
		0,031 (X)	15,5
		0,159	83,0
I-124	4,17 D	0,027 (X)	46,8
		0,031 (X)	10,3
		0,603	62,0
		1,691	10,7
I-125	60,14 D	0,027 (X)	112,2
		0,031 (X)	23,5
		0,035	6,6
I-126	13,02 D	0,027 (X)	35,5
		0,031 (X)	7,7
		0,388	32,4
		0,666	31,2
I-129	$1,57 \cdot 10^7$ A	0,029 (X)	55,0
		0,034 (X)	12,2
		0,040	7,5
I-130	12,36 H	0,536	99,5
		0,668	96,6
		0,739	82,7
I-131	8,04 D	0,030 (X)	3,9
		0,034 (X)	0,9
		0,364	81,2
		0,636	7,3
I-132	2,4 H	0,668	98,7
		0,773	76,2
		0,955	
I-133	20,3 H	0,530	87,5
		0,876	4,6
I-134	52,6 M	0,847	96,0
		0,884	66,0
		1,073	14,3
I-135	6,61 M	1,131	22,5
		1,260	28,6

* X=Röntgen

2.2 Erzeugung von Radiojod

2.2.1 Für medizinische Zwecke

Jod-125 : wird aus angereichertem Xenon im Reaktor hergestellt und zwar nach der Reaktion :

$$\text{Xe-124}\ (n,\gamma)\ \text{Xe-125} \xrightarrow{17\ h} \text{I-125}$$

Jod-131 : wird aus Tellur im Reaktor hergestellt. Nimmt man natürliches Tellur, entstehen verschiedene Jodisotope.

Am wichtigsten sind :

Te-126(zu 19%) (n,γ) Te-127(9,3h) J-127(stabil)
Te-128(zu 32%) (n,γ) Te-129(72 Minuten) I-129
Te-130(zu 34%) (n,γ) Te-131(25 Minuten) I-131

Jod-123 : I-127(natürliches Jod) (p,5n) Xe-123(2h) I-123

mögliche Reaktionen (p,4n) Xe-124: stabil
(p,3n) Xe-125: (17h) I-125
(p,2n) Xe-126: stabil
(p,6n) Xe-122: (20h) I-122)
(3 Minuten)
(p,n) Xe-127: (36d) I-127

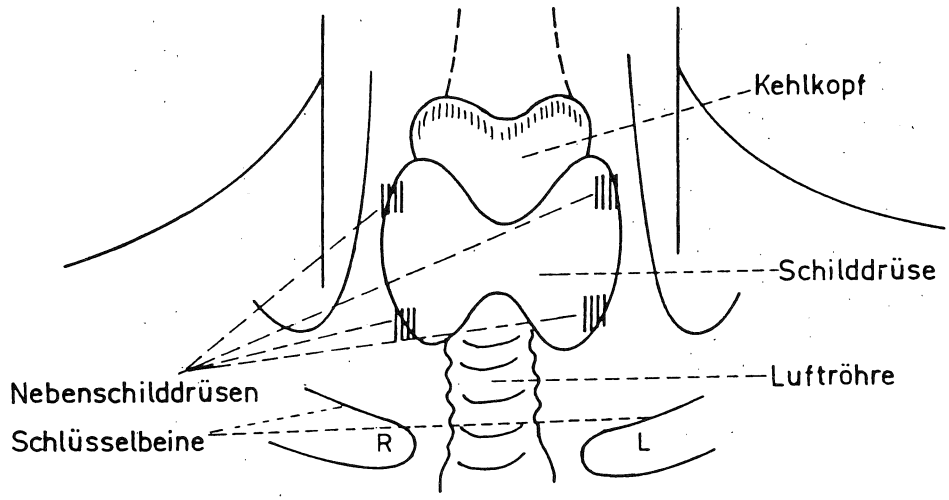
2.2.2 Im nuklearen Brennstoffkreislauf

Bei der Kernspaltung entstehen die Radiojodisotope 129 bis 139. Die wichtigsten sind: I-129, I-131, I-132, I-133, I-134 und I-135. I-129 entsteht bei der Spaltung von U-235 oder Pu-239 mit einer Spaltausbeute von ungefähr 1 %:(U-235, n_{th}) ---→ I-129 (0,65%), (Pu-239, n_{th}) ----→ I-129 (1,7 %).

3.1 Form, Lage und Aufbau der Schilddrüse

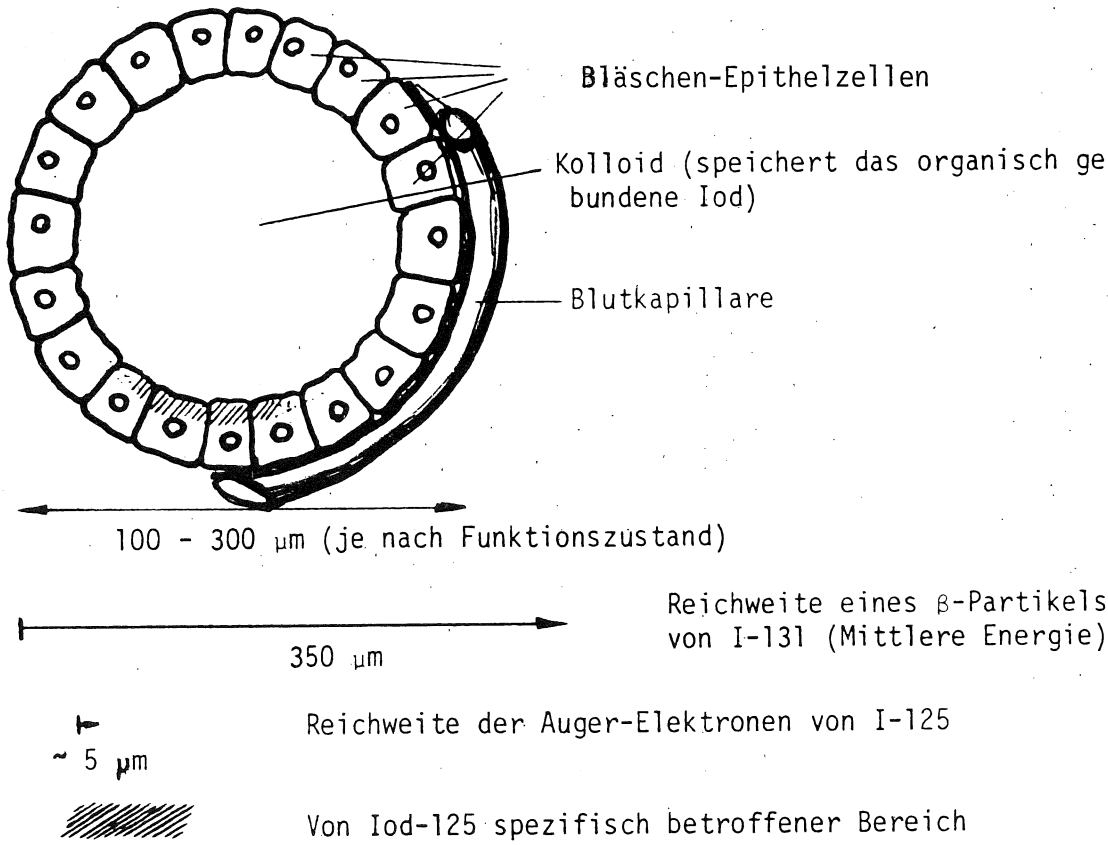
Die Schilddrüse liegt vor dem Kehlkopf und dem oberen Teil der Luftröhre und wird von Halsmuskeln überdeckt. Sie wiegt bei einem Erwachsenen 20 - 40 g (ICRP-23 "Reference Man": 20 g) und ähnelt in der Form einem Schmetterling (Abb. 1). Die Drüse besteht aus einer Vielzahl kleiner Bläschen (Abb.2), die Hormone synthetisieren und speichern.

Abb. 1 : Vorderansicht der Schilddrüse (Originalgrösse)



3.1 Form, Lage und Aufbau der Schilddrüse

Abb. 2: Ansicht eines Bläschens



3.2 Die Funktion der menschlichen Schilddrüse

Das Verhalten des radioaktiven Jods im menschlichen Organismus wird wesentlich von der Funktion der Schilddrüse und ihrer Regelung bestimmt. Ein Modell des Jodstoffwechsels im Menschen ist in der Abbildung 3 wiedergegeben.

Hiernach wird Jodid über feste und flüssige Nahrung sowie die Atemluft zugeführt, gelangt somit in die Blutbahn, von wo aus es zum Teil in der Schilddrüse angereichert und zum Teil über die Nieren, den Schweiss und die Atemluft wieder ausgeschieden wird. Nach seinem Eintritt in die Schilddrüse wird es über mehrere biochemische Schritte in Trijodthyronin (T_3) und Tetrajodthyronin (T_4), die beiden Schilddrüsenhormone, eingebaut. Bei Bedarf werden T_4 und T_3 durch nervale Reize oder das schilddrüsenanregende Hormon (TSH) aus der Drüse in die Blutbahn freigesetzt. Im Organismus, ausserhalb der Schilddrüse, werden die beiden Hormone wieder dejodiert. Das abgespaltene Jod verhält sich wieder gleich dem durch die Nahrung und Luft zugeführten Jod, es tritt in den Kreislauf zwischen Schilddrüse und Organismus ein, wird also zum Teil wiederverwendet und zum Teil ausgeschieden. Bedingt durch den grossen Jodvorrat in der Schilddrüse und dem komplexen Ablauf der Hormonsynthese stellt sich bei einmaliger Zufuhr von radioaktivem Jod erst langsam ein Pseudogleichgewicht zwischen Schilddrüse und Restorganismus ein. Die Aktivitäten von I-131-Fraktionen im menschlichen Organismus ausserhalb der Schilddrüse sind in Abbildung 4 wiedergegeben. Es sind neben dem gesamten I-131 das anorganische I-131, I-131-T_3 und I-131-T_4, dargestellt als Funktion der Zeit nach der Inkorporation.

3.2 Die Funktion der menschlichen Schilddrüse

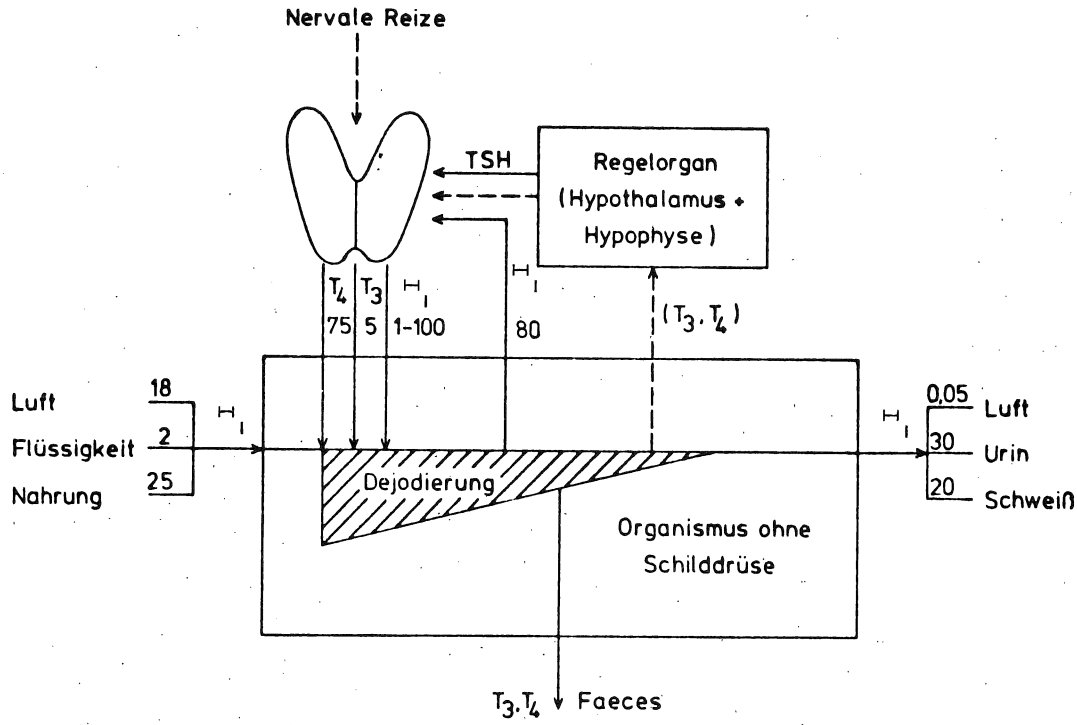


Abb. 3 : Modell des Jodstoffwechsels im Menschen, Zahlenangaben in µg/d gültig für Mitteleuropäer

———: Transportwege, -----: Regelung

T_3: Trijodthyronin; T_4: Tetrajodthyronin ; I^- = Jodid

TSH: schilddrüsenfunktionanregendes Hormon

3.2 Die Funktion der menschlichen Schilddrüse

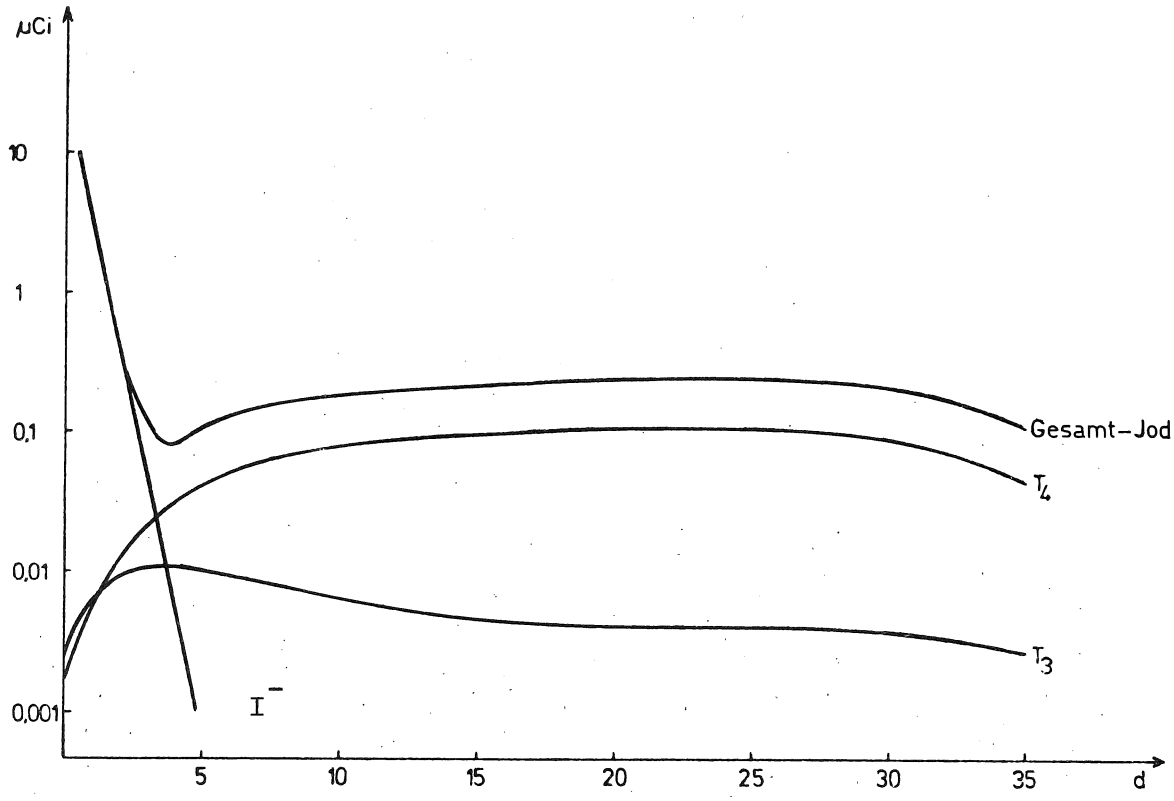


Abb. 4 : Die Verteilung der drei Jodfraktionen ausserhalb der Schilddrüse als Funktion der Zeit nach einmaliger Gabe von 25 µCi Jod-131 beim Menschen

Trotz der von Anfang an in der Schilddrüse durch radioaktiven Zerfall und Ausscheidung abnehmenden Radioaktivität steigt im Organismus ausserhalb der Schilddrüse die Aktivität zwischen der 1. und 3. Woche nach Inkorporation zunächst noch an und sinkt erst danach parallel zur Aktivität in der Schilddrüse ab. Verwendet man I-125 als Tracer, lassen sich die Verhält-

nisse über einen längeren Zeitraum verfolgen. Dabei ist zu erkennen, dass die Ausscheidung des radioaktiven Jods über lange Zeit sich mit nur einer Exponentialfunktion beschreiben lässt (Abbildung 5).

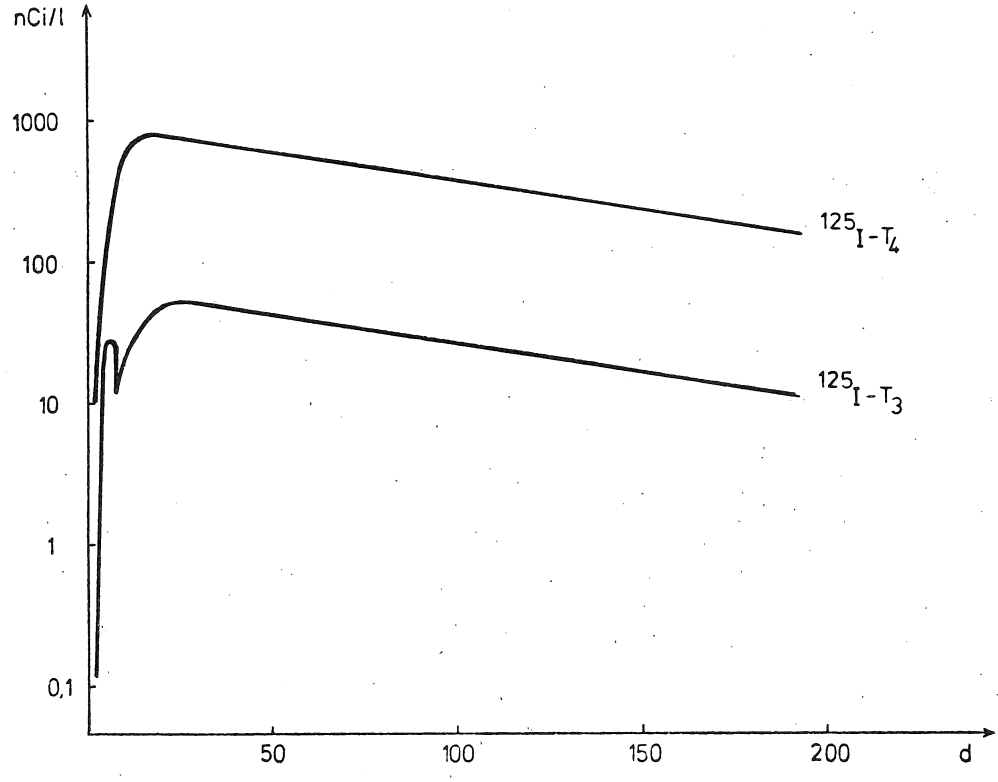


Abb. 5 : Die beiden Serumjodfraktionen T_3 und T_4 nach einmaliger Gabe von 100 µCi Jod-125 beim Menschen als Funktion der Zeit bis zu 180 Tagen nach Jodgabe

Aus dieser Darstellung wird auch erkenntlich, dass die Strahlenbelastung des Organismus, die der Fläche unter den Kurven entspricht, wesentlich von dem organisch gebundenen Radiojod

verursacht wird. Die Strahlenbelastung des Organismus lässt sich demnach wesentlich verringern, wenn es gelingt, die organische Bindung des Radiojod zu verhindern. Einen solchen Fall zeigt die Abbildung 6. Hier wurde die Schilddrüse durch orale Gabe von 100 mg KI vor Inkorporation des I-131 blockiert. Die zweite Fraktion ausser Jodid wird durch unspezifisch markierte Eiweissstoffe gebildet, die mit einer biologischen Halbwertszeit von 10 - 30 Tagen ausgeschieden werden.

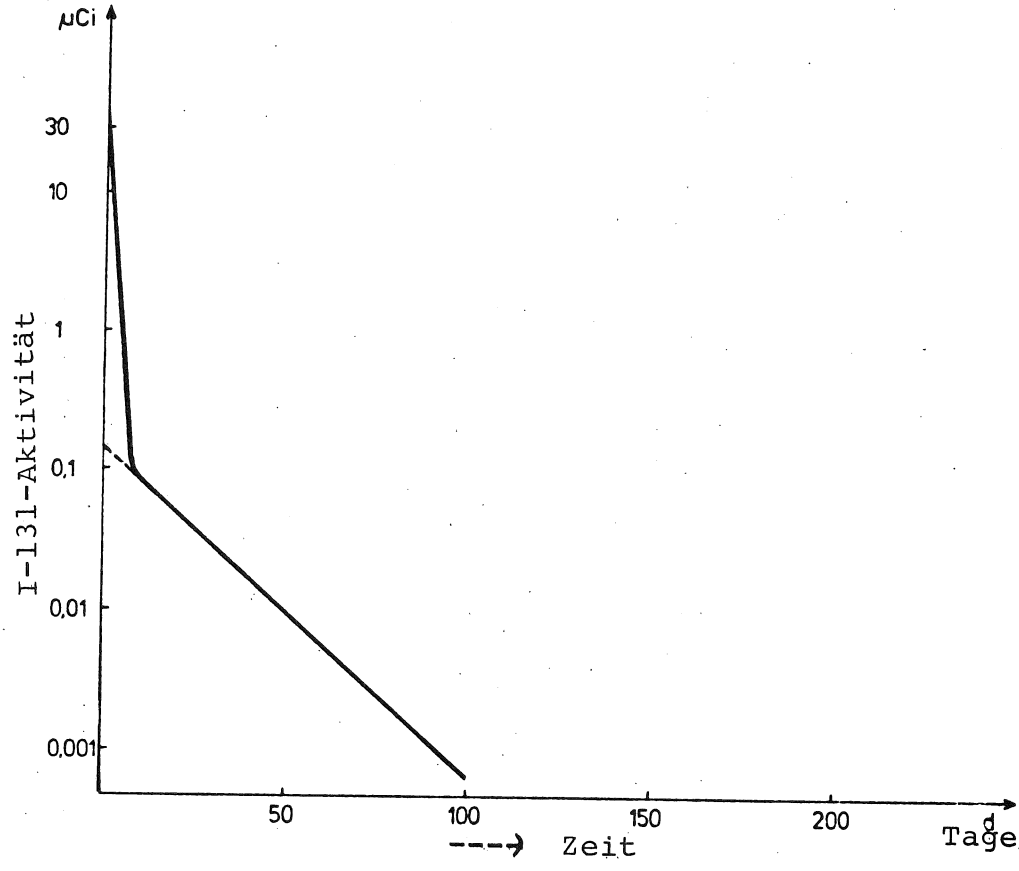


Abb. 6 : Jod-131 als Funktion der Zeit nach vorheriger Blockade der Schilddrüse mit 100 mg KI. Es wurden 30 µCi Iod-131 appliziert und die Aktivität ausserhalb der Schilddrüse gemessen.

3.2 Die Funktion der menschlichen Schilddrüse

Einige wichtige Zahlenangaben zum Jodstoffwechsel im Menschen sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3 : Schilddrüsenhormone und Jodid im Menschen

	T_4	T_3	Jodid
Jodgehalt des Hormons (%)	62,5	45	-
Konzentration im Serum (µg/100 ml)	8	0,15	0,07
davon eiweissgebunden (%)	99,9	99,9	2
Totalgehalt im Organismus (µg) (ausser Schilddrüse)	800	60	14
Verteilungsvolumen (l)	10	40	20
biologische Halbwertszeit (d)	9	0,9	0,3
Verbrauch pro Tag (µg)	80	35	50

Der beschriebene Jodstoffwechsel im Menschen kann ausser durch Zufuhr von Jodid noch durch andere jodhaltige Verbindungen wie beispielsweise Jobenzaminsäure, Bunamiodyl, Jocetaminsäure o.ä. beeinflusst werden. Diese Verbindungen weisen den Vorteil der langsameren und damit länger andauernden und somit länger wirkenden Jodidfreisetzung auf. Eine Verminderung der Strahlenbelastung durch Radiojod kann auch mit anderen Substanzen versucht werden, die an unterschiedlichen Stellen in den Jodstoffwechsel eingreifen :

1. Freisetzung von Jodid und Hemmung der TSH-Anregung durch T_3 oder T_4
2. Schnellere Dekorporierung des Radiojod durch TRH und TSH
3. Blockierung der organischen Bindung von Radiojod durch Thiouracil oder Methylmercaptoimidazol.

Jod wird in seinen hauptsächlichsten chemischen Formen (I^-, I_2) sehr schnell und vollständig aus der Lunge und dem Magen-Darm-Kanal ins Blut übergeführt. Die Aufnahme aus Magen und Darm beträgt pro Minute ungefähr 5 % des Jodgehaltes im Magen-Darm-Trakt.

Der Anteil der in der Schilddrüse inkorporierten Aktivität ist von der Art der Aufnahme (oral, intravenös, subcutan) unabhängig. Man nimmt an, dass bei jedem Durchgang durch die Schilddrüse mehr als 90 % des Jodgehaltes im Blut zurückgehalten wird. Im Mittel wird ungefähr 40 - 60 % (55% in Deutschland) der inkorporierten Aktivität in die Schilddrüse eingebaut.

Bei der Schädigung der Schilddrüse durch Radiojod werden Früh- und Spätschäden unterschieden.

4.1 Frühschäden

Die Strahlung führt zu Gewebsschädigungen, die die Produktionskapazität von Thyroxin und Trijodthyronin vermindern. Diese Wirkung benützt man zur Behandlung der Hyperthyreose (ungefähr 10 mCi I-131). Bei Schilddrüsenkrebs kann durch hohe Dosen (bis 250 mCi I-131 auf einige Wochen verteilt) das Krebsgewebe zerstört werden. Es gibt Tumore der Schilddrüse, die Jod verstärkt speichern (sog. "autonomes Adenom", im Szintigramm nach Radiojodabgabe gut sichtbar; günstig für Radiotherapie). Verkalkte oder nekrotische Bezirke sowie Zysten, die Jod nur vermindert speichern, sind der Radiojodtherapie nicht zugänglich.

4.2 Spätschäden

Die Strahlung kann Schilddrüsenkrebs induzieren. Im Gegensatz zur Gewebeschädigung, die erst ab einer gewissen Dosis - dann aber mit Sicherheit - manifest wird, kann jedoch eine krebserregende Schwellendosis (Mindestdosis), unter der eine Tumorbildung auszuschliessen ist, nicht angenommen werden.

Abb. 7 : Geschätztes Risiko für Krebsentstehung nach einer Dosis von 1 rad und der Annahme einer linearen Dosiswirkungsbezeichnung unterhalb von 100 rad.

Schädigungsart	Fälle pro 10^6 bestrahlte Personen*	Risikoordnung+
Leukämie ++	20	5te
übrige Krebsarten	20	5te
Schilddrüsen-Karzinome +++	10 - 20	5te

+ n-te Ordnung bedeutet: 1 - 9 Fälle auf 10^n Personen

* Beobachtungszeitraum: 10 - 20 Jahre

++ Bei Bestrahlung des Föten kann das Risiko um den Faktor 2 - 10 grösser werden

+++ Der Schätzwert bezieht sich auf Bestrahlung in der Kindheit; abweichend von anderen Krebsrisiken ist beim Schilddrüsenkarzinom die Häufigkeit bei weitem nicht mit der Zahl der Todesfälle gleichzusetzen, da die Betroffenen eine lange Ueberlebenschance besitzen und meist aus anderen Gründen versterben.

4.3.1 Dosisberechnungen unter Berücksichtigung des individuellen Stoffwechselverhaltens

Nur in Ausnahmefällen wird es im Strahlenschutz nötig sein, mit aufwendigen Methoden sehr genaue Dosisbestimmungen für Einzelpersonen vorzunehmen. Für solche Fälle wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Tabelle 4 : Strahlenbelastung in rad pro µCi in die Schilddrüse inkorporierte Aktivität

Alter	rad / µCi			
	I-123	I-125	I-129	I-131
0	0,026	0,52	2,7	4,4
1	0,030	0,71	4,0	5,8
2	0,026	0,84	4,8	5,7
5	0,024	0,88	5,1	5,2
10	0,014	0,75	3,2	2,2
15	0,010	0,64	2,7	1,5
20	0,010	0,77	3,5	1,4
30	0,010	0,89	4,6	1,4
40	0,010	0,94	5,0	1,5
50	0,011	0,97	5,3	1,6
60	0,011	1,04	6,0	1,8
70	0,012	1,15	7,4	2,3

Tabelle 5a : Strahlenbelastung der Schilddrüse und der Gonaden durch I-131-Therapien.

Therapie	einmalige Inkorporation mCi	Erwartungsdosis (mrem) Schilddrüse	Gonaden
Schilddrüsenkrebs (Zelltod)	100	200'000	200
Hyperthyreose	8	16'000	16

Tabelle 5b : Dosis in rem pro zugeführtes mCi (nach Roedler, 1973)

	^{123}I	^{125}I	^{131}I
Schilddrüse	20	2000	2000
Gonaden	0,03	0,2	0,2
Lunge	0,03	0,3	0,5
Skelett	0,03	0,4	0,4
Restkörper	0,03	0,7	0,5

4.3.2 Beurteilung von Messwerten der Inkorporationsüberwachung mittels Stoffwechselmodellen der ICRP

Im Strahlenschutz kann es nützlich sein, Grenzwerte für die Aktivitätszufuhr festzulegen. Da die tatsächlichen Werte der Aktivitätszufuhr (wie auch die Organdosen) nicht direkt messbar sind, muss ein mathematischer Zusammenhang zwischen den Messwerten der Inkorporationsüberwachung und den das Mass der Strahlenbelastung darstellenden Grössen (Aktivitätszufuhr, Organdosen) hergeleitet werden. Dazu werden die Stoffwechselmodelle der ICRP verwendet.

Die Beurteilung von Inkorporationsmesswerten für Jod wird stark vereinfacht, wenn es sich um Direktmessungen, insbesondere um Schilddrüsenmessungen handelt. Urinanalysen sind zufolge der zwei verschiedenen biologischen Halbwertszeiten für die Jodausscheidung nicht einfach zu interpretieren. Insbesondere bei chronischen Jodaufnahmen sind quantitative Aussagen aufgrund von Urinanalysen fast unmöglich.

Die quantitative Beurteilung von Jod-Inkorporationen sollte deshalb hier nur für Schilddrüsenmessungen vorgenommen werden.

4.3.2.1 Methode der Beurteilung

Eines der Hauptziele der Beurteilung von Inkorporationsmesswerten im Strahlenschutz ist der Vergleich einer vorliegenden Inkorporation mit dem zugehörigen Grenzwert. Eine geeignete Beurteilungsgrösse ist somit das Verhältnis zwischen der zugeführten Aktivität (Z) und dem Grenzwert für die Jahres-Aktivitätszufuhr (ALI = Annual Limit of Intake). In Prozent ausgedrückt lautet diese Grösse:

$$I_{\%} = 100 \frac{Z}{ALI}$$

Z kann unter Annahme des Stoffwechselmodells der ICRP aus den Messwerten berechnet werden.

4.3.2.2 Einmalige Inkorporation

Bei bekanntem Inkorporationszeitpunkt kann Z leicht berechnet werden:

$$Z = \frac{1}{f} A_{SD}(t) \cdot 2^{t/T_{eff}}$$

Z : Aktivitätszufuhr

$A_{SD}(t)$: Aktivität in der Schilddrüse, gemessen t Tage nach der Inkorporation

t : Zeit zwischen Inkorporation und Messung in Tagen

T_{eff} : effektive Halbwertszeit in der Schilddrüse in Tagen

$$T_{eff} = \frac{T_b \cdot T_p}{T_b + T_p}, \quad T_b = 120 \text{ d (ICRP-30)}, \quad T_b = 135 \text{ d (ICRP-2)}$$

f : Bruchteil der in die Schilddrüse aufgenommenen Aktivität bei

- Inhalation: $f_a = 0.23$ (ICRP-2)
  $= 0.19$ (ICRP-30)
- Ingestion : $f_w = 0.3$ (ICRP-2/-30)

Die Beurteilungsgrösse lautet damit:

$$I_{\%} = 100 \frac{A_{SD}(t)}{ALI \cdot f} \cdot 2^{t/T_{eff}}$$

4.3.2.3 Wiederholte Inkorporation

In ICRP-2 wurde der Grenzwert qf_2 für die mittlere Organaktivität angegeben. Diese Grösse lässt sich auch aus dem Grenzwert der Jahreszufuhr (ALI) berechnen ($T_{eff} << 50$ Jahre für Jod):

$$qf_2 = \frac{ALI \cdot f \cdot T_{eff}}{\ln 2}$$

Die Beurteilungsgrösse kann nun wie folgt berechnet werden:

$$I_{\%} = \frac{100 \cdot \bar{A}_{SD} \cdot T_e}{qf_2}$$

$\bar{A}_{SD}$: Mittlere Aktivität in der Schilddrüse

T_e : Expositionsdauer über die die Messungen gemittelt wurden als Bruchteil eines Jahres

qf_2 : Grenzwert der mittleren Aktivität in der Schilddrüse

4.3.2.4 Grenzwerte der Jahreszufuhr

ICRP-30: ALI-Werte für die Inhalation

Annual limits on intake, ALI(Bq) and derived air concentrations, DAC(Bq/m³) (40 h/wk) for isotopes of iodine

Radionuclide		Oral $f_1 = 1$	Inhalation Class D $f_1 = 1$
^{120}I	ALI	1×10^8 (3×10^8) Thyroid	3×10^8 (5×10^8) Thyroid
	DAC	—	1×10^5
^{120m}I	ALI	4×10^8 (5×10^8) Thyroid	8×10^8
	DAC	—	3×10^5
^{121}I	ALI	4×10^8 (1×10^9) Thyroid	7×10^8 (2×10^9) Thyroid
	DAC	—	3×10^5
^{123}I	ALI	1×10^8 (4×10^8) Thyroid	2×10^8 (7×10^8) Thyroid
	DAC	—	9×10^4
^{124}I	ALI	2×10^6 (6×10^6) Thyroid	3×10^6 (1×10^7) Thyroid
	DAC	—	1×10^3
^{125}I	ALI	1×10^6 (5×10^6) Thyroid	2×10^6 (8×10^6) Thyroid
	DAC	—	1×10^3
^{126}I	ALI	8×10^5 (3×10^6) Thyroid	1×10^6 (4×10^6) Thyroid
	DAC	—	5×10^2
^{128}I	ALI	2×10^9 (2×10^9) ST Wall	4×10^9
	DAC	—	2×10^6

Radionuclide		Oral $f_1 = 1$	Inhalation Class D $f_1 = 1$
^{129}I	ALI	2×10^5 (7×10^5) Thyroid	3×10^5 (1×10^6) Thyroid
	DAC	—	1×10^2
^{130}I	ALI	1×10^7 (4×10^7) Thyroid	3×10^7 (7×10^7) Thyroid
	DAC	—	1×10^4
^{131}I	ALI	1×10^6 (4×10^6) Thyroid	2×10^6 (6×10^6) Thyroid
	DAC	—	7×10^2
^{132}I	ALI	1×10^8 (3×10^8) Thyroid	3×10^8 (6×10^8) Thyroid
	DAC	—	1×10^5
^{132m}I	ALI	1×10^8 (4×10^8) Thyroid	3×10^8 (7×10^8) Thyroid
	DAC	—	1×10^5
^{133}I	ALI	5×10^6 (2×10^7) Thyroid	1×10^7 (3×10^7) Thyroid
	DAC	—	4×10^3
^{134}I	ALI	8×10^8 (1×10^9) Thyroid	2×10^9
	DAC	—	7×10^5
^{135}I	ALI	3×10^7 (9×10^7) Thyroid	6×10^7 (2×10^8) Thyroid
	DAC	—	2×10^4

Deutsche Strahlenschutzverordnung vom 13. Okt. 1976:

Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr über Luft resp. Wasser und Nahrung; diese Grenzwerte müssen mit $\frac{1000}{3}$ multipliziert werden um für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A anwendbar zu sein.

Tabelle IV 1: Freigrenzen und abgeleitete Grenzwerte[1]) der Jahres-Aktivitätszufuhr für Inhalation und Ingestion einzelner Radionuklide.

Ordnungszahl Z	Element	Radionuklid	Freigrenze		Grenzwerte der Jahres-Aktivitätszufuhr über Luft (Inhalation)		Grenzwerte der Jahres-Aktivitätszufuhr über Wasser und Nahrung (Ingestion)	
			(1/s)	(Ci)	(1/s)	(Ci)	(1/s)	(Ci)
1	2	3	4		5		6	
53	Jod	J-124	$3{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}1 \cdot 10^3$	$5{,}7 \cdot 10^{-8}$	$4{,}0 \cdot 10^3$	$1{,}1 \cdot 10^{-7}$ [2])
		J-125	$3{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}1 \cdot 10^3$	$5{,}7 \cdot 10^{-8}$	$4{,}0 \cdot 10^3$	$1{,}1 \cdot 10^{-7}$ [2])
		J-126	$3{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}0 \cdot 10^3$	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$	$1{,}5 \cdot 10^3$	$4{,}1 \cdot 10^{-8}$
		J-129	$3{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$4{,}4 \cdot 10^2$	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	$3{,}3 \cdot 10^2$	$9{,}0 \cdot 10^{-9}$
		J-130	$3{,}7 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$2{,}1 \cdot 10^3$	$5{,}7 \cdot 10^{-8}$	$4{,}0 \cdot 10^3$	$1{,}1 \cdot 10^{-7}$ [2])
		J-131	$3{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}4 \cdot 10^3$	$6{,}6 \cdot 10^{-8}$	$1{,}8 \cdot 10^3$	$4{,}8 \cdot 10^{-8}$
		J-132	$3{,}7 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$6{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}8 \cdot 10^{-6}$	$5{,}0 \cdot 10^4$	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$
		J-133	$3{,}7 \cdot 10^4$	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$8{,}9 \cdot 10^3$	$2{,}4 \cdot 10^{-7}$	$6{,}7 \cdot 10^3$	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$
		J-134	$3{,}7 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^5$	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}1 \cdot 10^5$	$2{,}9 \cdot 10^{-6}$
		J-135	$3{,}7 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	$2{,}9 \cdot 10^4$	$7{,}8 \cdot 10^{-7}$	$2{,}1 \cdot 10^4$	$5{,}8 \cdot 10^{-7}$

[1]) Entsprechend 3/500 — für Jodisotope 3/1000 — der Körperdosiswerte der Anlage X Spalte 2 für das kritische Organ.

[2]) Grenzwerte der Jahres-Aktivitätszufuhr für nicht aufgeführte β-Strahler, deren Halbwertszeiten größer sind als 1 Stunde.

Schweizer Strahlenschutzverordnung vom 30. Juni 1976:

I_a- und I_w-Werte für Inhalation resp. Ingestion sowie qf_2.

Nuklid	Halbwertszeit	Strahlen- und Zerfallsart	Γ	Form	krit. Organ	Dauerexposition					Einmalige Exposition
						qf_2 (μCi)	I_a (Ci/a)	C_a (Ci/m³)	I_w (Ci/a)	C_w (Ci/m³)	DECO (rem/μCi)
(1)	(2)	(3)	(4) (Rm²/Cih)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
J-123	13.3 h	ε, γ	0.065	t nt	o b	0.91	2×10^{-3} 8×10^{-3}	7×10^{-7} 3×10^{-6}	2×10^{-3} 5×10^{-3}	5×10^{-3} 0.02	8×10^{-3}
J-124	4.2 d	β^+, γ	0.68	t nt	o b	0.11	3×10^{-5} 6×10^{-4}	1×10^{-8} 2×10^{-7}	2×10^{-5} 3×10^{-4}	8×10^{-5} 1×10^{-3}	0.3
J-125	60 d	ε, γ	0.0044	t nt nt	o c b	1.1 21	3×10^{-5} 1×10^{-3}	1×10^{-8} 4×10^{-7}	2×10^{-5} 4×10^{-3}	8×10^{-5} 0.02	1
J-126	13.3 d	β^-, ε, γ	0.202	t nt nt	o c b	0.21 4.7	2×10^{-5} 8×10^{-4}	8×10^{-9} 3×10^{-7}	2×10^{-5} 8×10^{-4}	5×10^{-5} 3×10^{-3}	2
J-129	1.7 × 107 a	β^-, e⁻, γ	0.0047	t nt nt	o c b	0.49 10	4×10^{-6} 2×10^{-4}	2×10^{-9} 7×10^{-8}	3×10^{-6} 2×10^{-3}	1×10^{-5} 6×10^{-3}	6
J-130	12.4 h	β^-, γ	1.2	t nt	o b	0.069	2×10^{-4} 7×10^{-4}	6×10^{-8} 3×10^{-7}	1×10^{-4} 4×10^{-4}	4×10^{-4} 2×10^{-3}	0.06
J-131	8.08 d	β^-, e⁻, γ	0.21	t nt nt	o c b	0.15 2.8	2×10^{-5} 8×10^{-4}	9×10^{-9} 3×10^{-7}	2×10^{-5} 5×10^{-4}	6×10^{-5} 2×10^{-3}	2
J-132	2.3 h	β^-, e⁻, γ	1.3	t nt	o b	0.05	6×10^{-4} 2×10^{-3}	2×10^{-7} 9×10^{-7}	5×10^{-4} 1×10^{-3}	2×10^{-3} 4×10^{-3}	0.02
J-133	21 h	β^-, γ	0.32	t nt	o b	0.06	8×10^{-5} 6×10^{-4}	3×10^{-8} 2×10^{-7}	6×10^{-5} 3×10^{-4}	2×10^{-4} 1×10^{-3}	0.3
J-134	52.5 min	β^-, γ	1.06	t nt	o b	0.04	1×10^{-3} 8×10^{-3}	5×10^{-7} 3×10^{-6}	1×10^{-3} 5×10^{-3}	4×10^{-3} 0.02	4×10^{-3}
J-135	6.7 h	β^-, γ	0.903	t nt	o b	0.06	3×10^{-4} 1×10^{-3}	1×10^{-7} 4×10^{-7}	2×10^{-4} 5×10^{-4}	7×10^{-4} 2×10^{-3}	0.07

5.1 Grundlagen der Therapie

Grundsätzlich muss zu jeder Therapie ein Arzt beigezogen werden. Es bieten sich mehrere Möglichkeiten, durch Beeinflussung einer oder mehrerer Reaktionen des Jodkreislaufes die Halbwertszeit des Jods im Körper und damit die Folgedosis für inkorporiertes Jod zu verkleinern. Da jeder Eingriff in den Stoffwechsel Nebeneffekte bringen kann, bleiben für den Strahlenschutz nur wenige erfolgsversprechende Therapiemöglichkeiten übrig, die im folgenden besprochen werden.

5.1.1 Jodid-Therapie

Weil die Schilddrüse nur eine beschränkte Menge Jod aufnehmen kann, ist es möglich, durch Einnahme von Kaliumjodidtabletten (100 mg Jod) oder von jodhaltigen Präparaten (z.B. Jobenzaminsäure, Bunamiodyl, Jocetaminsäure o.ä.) die Aufnahme von Radiojod in die Schilddrüse weitgehend zu reduzieren.

Die organischen Jodverbindungen weisen gegenüber Jodid (5 - 10 Stunden) den Vorteil der längeren biologischen Verweilzeit (3 - 10 Tage) im Organismus auf, was eine verlangsamte Freisetzung des Jodid mit sich bringt. Die Häufigkeit der Einnahme kann mit diesen Präparaten auf einmal pro Woche reduziert werden.

Das aufgenommene anorganische Radiojod wird mit einer Halbwertszeit von 5 - 15 Stunden über die Niere ausgeschieden. Die Einnahme von Jodid ist sinnvoll, wenn eine Inkorporation zu erwarten ist oder die Aufnahme weniger als 6 Stunden zurückliegt. Der Effekt beruht bei Zugabe vor dem Zwischenfall auf der Absättigung der Drüse, bei Zugabe nach dem Zwischenfall auf Verdünnung des im Blut zirkulierenden Radiojods. Je grösser die Verdünnung des Radiojods mit stabilem J-127 ist, desto kleiner ist die spezifische Aktivität des Blutjodids und damit die bis zur Erreichung der Jod-Aufnahmekapazität der Schilddrüse aufgenommene Radioaktivität (Tabelle 5).

Die Aufnahme des Jods in die Schilddrüse erfolgt sehr rasch. Beispiel: Schon zwei Stunden nach der intravenösen Verabreichung von Radiojod hat die normal funktionierende Schilddrüse

ca. 10% der Aktivität aufgenommen. Der Entscheid über eine Jodtherapie sollte deshalb möglichst früh gefällt werden.

Auch nach der Aufnahme des Radiojods in die Schilddrüse kann durch kontinuierliche Zufuhr von Jod (3 x 20mg KI/Tag) die biologische Halbwertszeit um ca.50% verkleinert werden.Dieser Effekt beruht auf der Verminderung der Wiederaufnahme von aus Thyroxin und Folgeprodukten abgespaltenem Radiojod in die Schilddrüse durch die erhöhte Konzentration von inaktivem I-127 im Blut (Verdünnungseffekt).

Anstelle von Jodid-Tabletten kann Jodat verwendet werden, das im Gegensatz zum Jodid auch bei unsachgemässer Lagerung (Wärme) stabil ist. Jodat soll die Radiojodaufnahme in die Schilddrüse ebenso gut wie Jodid-Verbindungen verhindern.

5.1.2 Blockierung der Jodaufnahme der Schilddrüse

Die einwertigen Ionen Rhodanid (CNS^-) und Perchlorat (ClO_4^-) sowie Jodat (IO_3^-) blockieren den aktiven Transport von Jodid vom Blut in die Schilddrüse und verhindern damit die Jodanreicherung. Auch diese Verbindungen können die Ausscheidung von bereits in organische Verbindungen eingebautem Radiojod durch Verhinderung der Wiederaufnahme nach dem Hormonabbau erhöhen. Die tägliche Dosis sollte z.B. beim Perchlorat 0,5 - 1 g betragen.

5.1.3 Blockierung der Hormonsynthese

Verbindungen wie Thiouracil, Methylmercaptoimidazol und Carbimazol unterbinden die Oxidation des Jodids zum Jod und damit auch den Einbau des Jods in das Hormon. Zur Blockierung der Thyroxinsynthese wird in der Medizin bei der Behandlung von Hyperthyreosen 20 - 100mg/Tag Methylmercaptoimidazol bzw. 150 - 160mg/Tag Propylthiouracil verwendet. Gleichzeitig muss Thyroxin in Tablettenform* verabreicht werden, da sonst wegen des Abfalles der Hormonkonzentration im Blut die Schilddrüse durch TSH fortwährend stimuliert würde (Gefahr der Kropfbildung).

Verbindungen wie z.B. Resorcin, die eine ähnliche Struktur wie Tyrosin besitzen, können anscheinend mit den Tyrosin-Resten des Thyreoglobins um das Jod konkurrenzieren. Da sie in der Schilddrüse nicht gespeichert werden, wird das von ihnen gebundene Jod rasch ausgeschieden.

5.1.4 Stimulierung der Hormonausschüttung

Ist das Radiojod schon im Thyreoglobulin der Schilddrüse organisch gebunden, bleibt als letzte Möglichkeit der Dosisverminderung, die Schilddrüse zur Abgabe von Thyroxin und Trijodthyronin zu bewegen. Dies geschieht wie aus Abbildung 5 erssichtlich, am besten durch intramuskuläre Injektion von TSH (alle Peptidhormone werden injiziert, da sie bei oraler Verabreichung im Magen-Darm-Trakt vor der Aufnahme ins Blut weitgehend zerstört würden).

Die Dosis beträgt am 1., 2., 3., 4., 6. und 8. Tag nach der Inkorporation je 10 I.E. TSH/Tag. Während der Therapie sollte mit Kaliumjodid die abermalige Aufnahme von aus dem Hormonabbau entstehendem Radiojodid in die Schilddrüse blockiert werden.

5.2 Einsatz von Therapien nach Zwischenfällen

Die vorliegenden Daten zeigen, dass durch geeignete Hormon- und/oder Chemotherapien vor und nach der Inkorporation von Radiojod die Strahlenbelastung der Schilddrüse stark reduziert werden kann. Bei grober Unterteilung können drei Gruppen möglicher Jodinkorporationen unterschieden werden :

1) Voraussehbare oder sofort erkennbare Inkorporation

Beispiele : Zwischenfälle in Kernkraftanlagen, Isotopenproduktionsstätten, Spitäler; Kampftruppen in verseuchten Gebieten

Durch Verabreichung von inaktivem Jod oder organischen Jodverbindungen wird die Aufnahme von Radiojod in die Schilddrüse vermindert.

Die Erwartungsdosis der Schilddrüse kann gegenüber unbehandelten Personen bis auf unter 5 % reduziert werden. Die Anreicherung der Aktivität in der Schilddrüse erfolgt relativ schnell. Nach 2 Stunden sind etwa 10%, nach 8 Stunden 35% und nach 24 Stunden etwa 55% der inkorporierten Aktivität in der Schilddrüse eingelagert. Die Therapie ist daher nur innerhalb der ersten 6 Stunden nach dem Ereignis erfolgsversprechend (Tabelle 5). Die Aufnahme ist individuell stark verschieden und unter anderem auch von der Jodaufnahme und der Nahrung abhängig.

2) Inkorporation wird erst nach Aufnahme des Jods in die Schilddrüse entdeckt

Beispiele : Unbemerkte Kontaminationen in Spitälern, Isotopenproduktion

5.2 Einsatz von Therapien nach Zwischenfällen

Je nach Aktivität des inkorporierten Radiojods (Bruchteile bzw. Mehrfaches der maximal zulässigen Organdosis) kann von einer Therapie abgesehen werden bzw. eine Chemotherapie oder die aufwendigere Hormontherapie kombiniert z.B. mit Carbimazol zur Anwendung gelangen.

Es zeigt sich, dass erst bei einer längeren physikalischen Halbwertszeit (> 5 Tage) eine Verkleinerung der biologischen Halbwertszeit auch zu einer signifikanten Abnahme der effektiven Halbwertszeit und damit der Strahlenbelastung führt.

5.3 Radiojod-Emissionen nach Unfällen

Die Strahlenbelastung der Schilddrüse kann durch Verminderung der Radiojodaufnahme so weit gesenkt werden, dass die Schilddrüse als kritisches Organ entfällt. Dies geschieht durch:

- Aufenthalt in Schutzräumen mit Aktivkohle-Luftfiltern
- Einnahme von Jodidtabletten oder Präparaten, die organisch gebundenes Jod enthalten
- Absetzen bzw. strengere Kontrolle kritischer Nahrungsmittel wie beispielsweise Milch, Trinkwasser und frische Gemüse. Besonders Kinder sind wegen ihrer kleinen Schilddrüse und der erhöhten Empfindlichkeit des wachsenden Gewebes besonders gefährdet.

Die Verkürzung der biologischen Halbwertszeiten des in die Schilddrüse aufgenommenen Jods kommt dagegen aus folgenden Gründen nicht in Frage :

- Die meisten der bei der Kernspaltung erzeugten Jodisotope haben eine sehr kurze Halbwertszeit (Tabelle 2). T_{eff} kann daher durch die Senkung von T_b nicht in nennenswertem Umfang gesenkt werden.

- Der Aufwand an medizinischem Personal zur Durchführung und Ueberwachung der Therapie wäre zu gross. Er könnte vor allem in Notzeiten nicht gewährleistet werden.

Tabelle 6 : Verminderung der Erwartungsdosis nach der Inkorporation von verschiedenen Radionukliden durch Chemo- bzw.Hormontherapie (ohne Behandlung ≙ 100%).Die Halbwertszeiten gelten für die Schilddrüse (Lit 1,2,3)

Therapie**	T_b Tage	Nuklid	T_{eff}	Erwartungsdosis %
-	138	I-129	138	100
-	138	I-125	41,8	100
-	138	I-131	7,6	100
-	138	I-123	0,55	100
Jodid vor der Inkorporation	-	I-1XY	-	0 - 5 *
Jodid 1 Std. nach d.Inkorp.	-	I-1XY	-	40 *
Jodid 3 Std. nach d.Inkorp.	-	I-1XY	-	65 *
Carbimazol	41	I-129	41	30
	41	I-125	27	57
	41	I-131	6,7	88
	41	I-123	0,54	99
TSH	16	I-129	16	12
	16	I-125	12,6	30
	16	I-131	5,3	70
	16	I-123	0,53	96
TSH +Carbimazol +Perchlorat	8	I-129	8	6
	8	I-125	7,1	17
	8	I-131	4	53
	8	I-123	0,53	95

* Mittelwerte; 30 - 100 mg Jodid
** Verabreichte Dosen, siehe Text. Beginn sofort nach Inkorporation.

6.1 Personenkreis und Ueberwachungsintervalle

Wie die Praxis zeigt, sind alle Personen, die im Jodlabor arbeiten, inkorporationsgefährdet.

Um den Fehler bei der Dosisberechnung klein zu halten, sollten die Abstände zwischen zwei Schilddrüsenmessungen zweimal $T_{1/2}$ des Jodisotopes nicht überschreiten. Jede Regelung muss aber die persönliche Inkorporationsgefährdung wie Arbeitsplatz, gehandhabte Aktivität, Art der Verarbeitung und Arbeitsweise berücksichtigen.

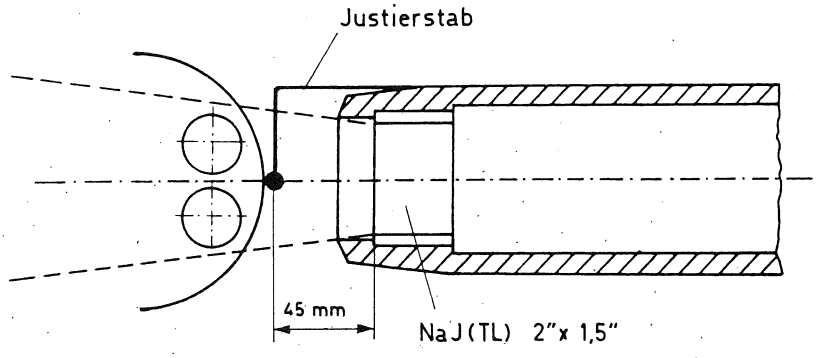
6.2 Messmethoden, Detektoren

Als Inkorporationsmessungen haben sich allgemein Schilddrüsenmessungen durchgesetzt, da sie einfach zu beurteilen sind.

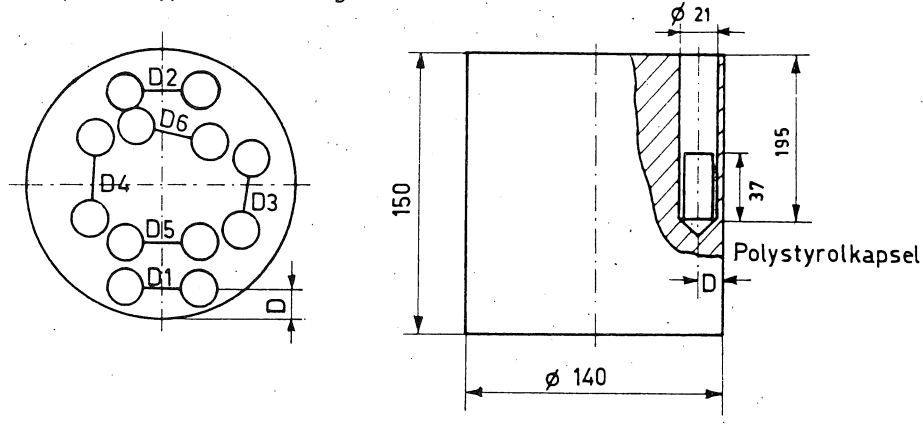
Ganzkörper- und Urinmessungen sind mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet, wie Kontamination, schwankende Ausscheidungsraten, inhomogene Verteilung und nur für stichprobenweise Ueberwachung geeignet.

6.2.1 Schilddrüsenmessungen

Als Detektoren für Schilddrüsenmessungen haben sich NaJ(Tl)-Szintillationskristalle mit Photomultiplier und Vorverstärker bewährt, die wahlweise den Einkanal- oder Vielkanalanalysatoren angeschlossen werden können.



Messkopf in typischer Messgeometrie



Position	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
D (cm)	1.1	1.8	2.5	3.2	3.8	4.4

6.2 Messmethoden, Detektoren

Für I-125 (I-123)-Messungen werden 1 - 2 mm dicke NaJ(Tl)-Kristalle, für I-131-Messungen hauptsächlich 1" x 1" und 3" x 3" NaJ(Tl)-Sonden eingesetzt.

Für die I-131-Messungen empfiehlt es sich, die Sonde mit Blei abzuschirmen.

Bei der Abbildung auf Blatt 6, Seite 2/2 ist ein Messkopf mit typischer Geometrie abgebildet. Darunter ein Modell des von der IAEA empfohlenen Halsphantoms zur Kalibrierung des Messplatzes.

Die Sonde wird mittels des Justierstabes in die Messposition gebracht. Mit den erwähnten NaJ(Tl)-Kristallen lassen sich bei Messzeiten von 100 Sekunden weniger als 5 nCi (185 Bq) I-131 und I-123 problemlos nachweisen.

Wie K. Jansen et al (5) zeigten, ergeben sich aus den Abweichungen zwischen Kalibrierung und tatsächlicher Schilddrüsenlagen und Grösse, den unterschiedlichen Gewebedicken, verschiedenen T_{eff} und Fehlern bei Justierungsungenauigkeiten bei der Joddepotbestimmung bis zu einem Faktor 2.

6.2.3 Urinmessungen

Eine Ermittlung der inkorporierten Radiojodmenge aufgrund von Urinanalysen ist grundsätzlich möglich, jedoch unsicherer als die Ganzkörper- oder Schilddrüsenmessung und schwieriger interpretierbar als diese. Die Schwierigkeit beruht hauptsächlich auf einer komplexen Ausscheidungsfunktion für inkorporiertes Radiojod mit mindestens 2 Exponentialfunktionen. Innerhalb der ersten 3 Tage nach der Inkorporation beträgt sie 5 - 10 Stunden für freies Jodid und später 60 - 120 Stunden für organisch gebundenes Jod in der Schilddrüse.

In der Zeit, die später als 3 Tage nach dem Inkorporationsereignis liegt, kann die inkorporierte Aktivität anhand einer Urinanalyse abgeschätzt werden, wenn man davon ausgeht, dass täglich etwa 0,6 % (0,2 - 2,0 %) des Schilddrüseninhaltes an Radiojod im Urin ausgeschieden werden. Hierzu kann eine 24 Stunden-Menge Urin gesammelt und gemessen werden. In einer kleineren Portion Urin kann auch die dort gemessene Aktivität auf ein Gramm Kreatinin bezogen werden, das in der gleichen Probe zu bestimmen ist. Diese Aktivität - bezogen auf 1 g Kreatinin - entspricht ebenfalls etwa der 24 Stunden-Ausscheidung an Radiojod.

Während die direkte Messung des I-131 oder I-123 in der Schilddrüse bis herab zu 1 nCi (37 Bq) problemlos möglich ist, müssen bei der Urinmessung 0,6 % hiervon in einer Tagesmenge (~ 1,2 - 1,5 l) nachgewiesen werden, also 6 pCi/Liter (ca. 200 mBq).

6.2 Messmethoden, Detektoren

Ein Nachweis dieser geringen Aktivität erfordert ausser der lästigen Urinsammlung entweder chemische Aufarbeitung oder aufwendige Messanordnungen, sodass in der Regel die Messung der Schilddrüse vorzuziehen ist.

6.3 Arbeitsplatzüberwachung

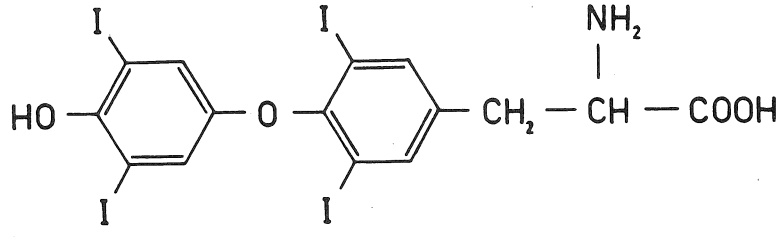
Durch die chemischen Eigenschaften von Jod bedingt muss bei einer sorgfältigen Arbeitsplatzüberwachung neben der Oberflächenkontrolle und der Ueberwachung fester Abfälle stets auch die Kontamination der Raumluft oder zumindest eine Abschätzung der maximal zu erwartenden Konzentration in der Luft durchgeführt werden. Zur Ueberwachung der Oberflächen und festen Abfälle genügen handelsübliche Flächenmonitore, um die gesetzlichen Forderungen zu erfüllen. Die Raumluft kann aufgrund der geringen Aktivitätskonzentrationen nur nach Anreicherung des Radiojods sinnvoll kontrolliert werden. Hierzu eignen sich alle Filtermaterialien, die Jod und Jodverbindungen anreichern, (z.B. Aktivkohle mit unterschiedlichen Imprägnierungen, Cellulose mit Silbernitratimprägnierung oder KI). Die jährliche Aktivitätszufuhr lässt sich aus der Aufenthaltsdauer der eingeatmeten Luftmenge und der ermittelten Radiojodkonzentration in der Raumluft bestimmen, wenn man davon ausgeht, dass bei einer Atemaktion mehr als 99 % des Jod aus der Atemluft in den Menschen gelangen. Von der inkorporierten Aktivität werden nur 0,5 %o wieder über die Atmungsluft abgegeben. In der Praxis ergibt sich nicht immer eine Korrelation zwischen Radiojodkonzentration in der Raumluft und der inkorporierten Aktivität, was zum Teil auf die inhomogene Verteilung des Radiojod in der Raumluft zurückzuführen ist. Diese wird im wesentlichen durch Art und Stärke der Belüftung bestimmt, denn eine Lufterneuerung von 2 - 10-mal pro Stunde,wie sie in Labor- und Arbeitsräumen üblich ist, führt immer zu inhomogener Verteilung von Frisch- und Atemluft.

E: englisch D: deutsch G: griechisch

≙ für synonym

Euthyreose :	normale Schilddrüsenfunktion
Glandula thyroidea (G) ≙ SD ≙ Thyroid gland (E)	Schilddrüse
Hyperthyreose ≙ Hyperthyroidism (E)	Ueberfunktion der Schilddrüse
Hypophyse	Hirnanhangdrüse an der Unterseite des Gehirns gelegen. Produziert eine Reihe von Hormonen, die die Aktivität von peripheren Hormondrüsen (Nebennierenrinde, Keimdrüsen, Schilddrüse etc.) steuern
Hypothalamus	Teil des Zwischenhirns unter dem Thalamus, der durch seine "releasing factors" als Bindeglied zwischen nervöser und hormonaler Regulation wirkt.
Hypothyreose ≙ Hypothyroidism (E)	Unterfunktion der Schilddrüse
Inkretion	Drüsenabsonderung nach innen, z.B. in die Blut- oder Lymphbahn (Gegensatz zu Sekretion)
Nebenschilddrüsen ≙Epithelkörperchen ≙glandula parathyreoidae (G) ≙Parathyroid glands (E)	4 linsengrosse Drüsen am Rande der Schilddrüse (siehe Abb.1); produzieren das Parathormon. Obwohl sie bei der Radiotherapie auch stark bestrahlt werden, ist weder Krebs noch Funktionsstörung je eindeutig nachgewiesen worden)
Parathormon	Hormon der Nebenschilddrüsen; reguliert Calzium- und Phosphatstoffwechsel

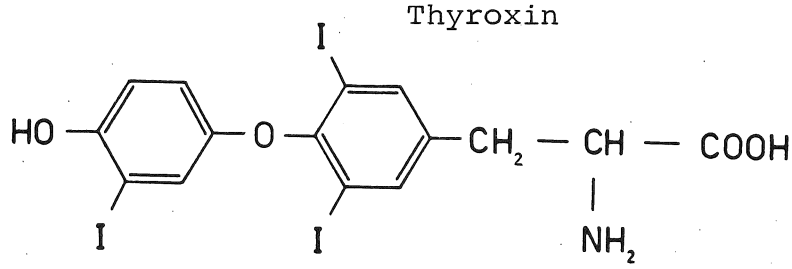
PBI ≙ Protein-Bound-Iodine (E)	Sammelbegriff für an Eiweiss gebundenes Jod (z.B. Thyroxin, das an TBG gebunden ist)
Proteolyse (G)	Abbau von Eiweiss
TBG (thyroxine binding globulin) TBPA (thyroxine binding prealbumin) Albumin	Eiweisse des Blutes, die Thyroxin und Trijodthyronin binden
T_3, T_4	siehe Thyroxin und Trijodthyromin
Thyreoglobulin	Eiweiss der Schilddrüse, das Thyroxin (genauer seine Vorstufen) speichert
Thyreozyten	Follikelepithelzellen der Schilddrüse, die Jod organisch binden
Thyronin ≙ Thyronine (E)	Grundgerüst der SD-Hormone
Thyroxin (genau L-Thyroxin) ≙ T_4 ≙ L-Tetraiodthyronin ≙ Thyroxine (E)	Hormon der Schilddrüse



TRH ≙ Thyreotropin Releasing Hormone (E)	Hormon des Hypothalamus, das die Ausschüttung des TSH durch den Hypophysenvorderlappen (HVL) stimuliert

Trioiodthyronin ≙ T_3
≙Trioiodthyronine(E)

Hormon der Schilddrüse; wirkt schneller und kürzere Zeit als Thyroxin

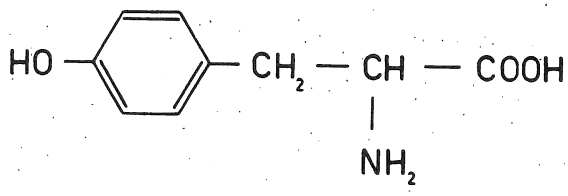


TSH (D,E) ≙ Thyroid Stimulating Hormone

Hormon des Hypophysenvorderlappens, das die Schilddrüse aktiviert (im Normalfall: 4 - 10 ng/ml Serum bei der Frau, 2 - 4 ng/ml Serum beim Mann)

L-Tyrosin ≙ Tyrosine (E)

aromatische Aminosäure (Baustein der Eiweisse und der Schilddrüsenhormone



Jod ist in der elementaren Form (I_2) leicht flüchtig (sublimiert). Die Gefahr einer Inhalation im Labor ist daher gross. Als Element der VII.Gruppe fehlt Jod nur ein Elektron zur besonders stabilen Edelgaskonfiguration. Deshalb kommt es in der Natur vor allem als Jodid (I^-), aber auch als Jodat (IO_3^-) vor. In sauren Lösungen kann der relativ leichtflüchtige Jodwasserstoff entstehen. Wie die anderen Halogene (Fluor, Chlor, etc.) ist es sehr reaktiv.

Einige Daten von Jod und Jodwasserstoff

Jod (I_2)	Schmelzpunkt	113,7°C
	Siedepunkt	184,4°C
	Elektronnegativität	2,21
	Löslichkeit in 100 ml Wasser von 20°	29 mg
Jodwasserstoff (HI)	Siedepunkt (bei 4 atü)	- 36°C
	Löslichkeit in 100 ml Wasser	42,5 l Gas
	pK-Wert	<<0

Relative Häufigkeit der verschiedenen Jodverbindungen und ihre Abscheidung in Filtern (+ vollständig; (+) von Porengrösse, Luftfeuchtigkeit abhängig; -schlecht) in der Abluft von Kernanlagen (Schätzungen)

Verbindung	Rel.Häufigkeit	Abscheidung in Filtern	
		Staubfilter	Aktivkohle
Jod I_2	80	-	+
Jodid I^-		-	+
Hypojodid IO^-	?	-	+
Jodat IO_3^-		-	+
Perjodat IO_4^-		-	+
Methyl-Jodid CH_3-I	5	-	(+)
Alkyl-Jodid R-I		-	(+)
partikulär gebundenes Jod	1*	(+)	+
NOI, NO_2I	**	-	(+)

* in Fallout ca.50%

** entsteht nur in Wiederaufbereitungsanlagen bei der Auflösung der ausgebrannten Stäbe mit Salpetersäure

(1) G. ERDMANN, W. SOYKA: "The Gamma Rays of the Radionuclides"
Verlag Chemie Weinheim, New York, 1979

(2) RAMSDEN D. et al : Radioiodine Uptakes in the Thyroid; Studies of the blocking and subsequent recovery of the gland following the administration of stable iodine,
UK Atomic Energy Authority, AEEW-R 444 (1965)
Health Physics 13 , 633 (1977)

(3) LIVADAS B.P. et al : Comparison of Various Treatment Schedules for Accelerating the Elimination of Radioiodine from Thyroid of the Human Body,
Nuklearmedizin 14, 219 (1975)

(4) CRONQUIST A. : The speed of suppression of iodate of Thyroid iodine uptake
Health Physics 21, 393 (1975)

(5) K. JANSEN, G. TANT : Zur Zuverlässigkeit der Bestimmung der Schilddrüsenbelastung durch Radiojod
Isotopenpraxis 10, 361 (1974)

Der vorliegende Teil der Loseblattsammlung ist mit dem Ziel entstanden, allgemeine Probleme des Strahlenschutzes einem größeren Interessentenkreis zugänglich zu machen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die Kenntnisse auf diesem Gebiet auf dem neuesten Stand zu halten.

Änderungswünsche und Verbesserungsvorschläge sind an den Sekretär des Arbeitskreises "Inkorporationsüberwachung", Dr.H.Schieferdecker, Med.Abt./Tox.Labor, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640, 7500 Karlsruhe, zu richten.

Als Manuskript gedruckt

FS-Berichte aus der Schriftenreihe des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V.
Zu beziehen durch das Sekretariat:
H. Brunner, Abt. SU, EIR, CH-5303 Würenlingen